

Міністерство освіти і науки України
Харківська національна академія міського господарства

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи з курсу

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Трансформатори

(для студентів та слухачів другої вищої освіти напрямів підготовки
6.050701 «Електротехніка та електротехнології»,
6.050702 «Електромеханіка»)

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «Електричні машини». Трансформатори (для студентів та слухачів другої вищої освіти напрямів підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 «Електромеханіка») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад: Глебова М.Л., Чернявська М.В., Кузнецов А.І., Фінкельштейн В.Б. – Х.: ХНАМГ, 2007. – 27 с.

Укладачі: М. Л. Глебова,
М. В. Чернявська,
А. І. Кузнецов,
В. Б. Фінкельштейн

Рецензент: д.т.н. професор А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою електротехніки,
протокол № 5 від 18.12.06

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Мета занять в лабораторії електричних машин — більш поглиблено вивчити і зрозуміти теоретичний матеріал, вміти застосовувати його на практиці в конкретних ситуаціях; проробити конструктивні елементи електричних машин з плакатами при наявності поздовжніх і поперечних перерізів машин, а також аксонометричних зображень; набути практичних навичок збирання схем пуску, гальмування, реверсування, регулювання частоти обертання двигунів, збудження та регулювання напруги генераторів; експериментально досліджувати електромеханічні характеристики, що обумовлюють робочі властивості різних електричних машин; систематично вивчати курс електричних машин для успішного складання іспитів.

Тематика лабораторних робіт підібрана відповідно до головних розділів курсу, а контрольні запитання є складовою частиною запитань, що пропонуються студентам на іспитах.

До виконання лабораторних робіт допускають студентів, які пройшли інструктаж з техніки безпеки на першому занятті. У лабораторії електричних машин, як і в інших лабораторіях (фізики, ТОЕ, електровимірів), металеві корпуси електричних машин і допоміжного обладнання обов'язково повинні бути заземлені. Дотик до струмопровідних ділянок, що знаходяться під напругою, являє собою особливу небезпеку, якщо одночасно проходить контакт із заземленим елементом. Крім того, необхідно враховувати наявність частин, що обертаються, вентиляцію, високий рівень шуму. Тому в лабораторії електричних машин треба бути вкрай обережним і уважним.

Готуючись до лабораторних робіт, студенти повинні, користуючись цими методичними вказівками, ознайомитись зі схемою, що наводиться на початку кожної роботи, з'ясувати мету, програму і порядок виконання роботи, підготувати чернетки, таблиці для занесення експериментальних та інших необхідних даних.

Крім того, використовуючи рекомендовану літературу або конспекти лекцій, студентам надають у письмовому вигляді скорочені відповіді на контрольні запитання і очікуваний вигляд функціональної залежності (графіки), які після виконання робіт повинні бути накреслені на міліметровому папері відповідно до результатів експериментів.

Звіт про лабораторну роботу повинен містити схеми дослідів, номінальні дані електричних машин, обладнання і приладів, таблиці, розрахунки, графіки і діаграми. Графічний матеріал виконують за допомогою креслярських інструментів. Лабораторну роботу захищають на занятті в лабораторії.

При захисті роботи студенти дають повні усні відповіді на запитання, що стосуються даної роботи, а також на контрольні запитання. Крім того, вони повинні вміти пояснити побудову функціональної залежності і порівняти її з очікуваною. Для ефективної роботи в лабораторії студентам необхідно мати при собі конспекти лекцій та підручники. Студентів, які не мають звіту про попередню роботу або не підготовлені до наступної, не допускають до неї.

Для підготовки і захисту лабораторних робіт рекомендують таку навчальну літературу:

1. И. П. Копылов. Электрические машины. — М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. А. В. Иванов-Смоленский. Электрические машины. — М.: Энергия, 1988.
3. А. И. Вольдек. Электрические машины. — Л.: Энергия, 1984.
4. Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. Электрические машины и микромашины. — М., Высш. шк., 1990. — 528с.: ил.

КОРОТКІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Електричною машиною називають електромеханічний пристрій, призначений для взаємного перетворення електричної і механічної енергії. Якщо машина перетворює механічну енергію в електричну, її називають генератором (на схемах позначають літерою G). Якщо машина перетворює електричну енергію в механічну, вона є двигуном (на схемах позначають літерою M). Генератори є головними джерелами електричної енергії, двигуни — головними споживачами. Всі типи електричних машин мають властивості перетворювача; одна і та ж машина може бути використана і як двигун, і як генератор (в такому разі на схемах її позначають MG). Існують також, але значно менше, й інші режими роботи електричної машини. Наприклад, машина може споживати і механічну, і електричну енергію (режим електромагнітного гальма; T — нестандартне позначення).

Перетворення двох видів енергії в електричній машині базується на двох законах електротехніки. Це закон електромагнітної індукції, згідно з яким у контурі виникає:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

і закон Ампера, згідно з яким на провідник зі струмом у магнітному полі діє сила

$$\vec{F} = \int_1 (\vec{B} \times \vec{i}) dl. \quad (2)$$

Електрорушійна сила (ЕРС) з необхідним елементом електричної енергії, сила механічної енергії. В обох випадках обов'язкова наявність магнітного поля, чим сильніше поле, тим інтенсивніше відбувається перетворення і тим більша потужність машини.

Трансформатор хоч і не електрична машина (у перетворенні не використовується механічна енергія), однак і фізично, і математично він має багато спільного з машиною. Наприклад, первинна обмотка трансформатора, як і двигун, споживає електричну енергію, а вторинна обмотка, як і генератор, віддає електроенергію споживачеві. Тому трансформатори є необхідною і важливою ділянкою електроенергетичних установок і вивчаються у загальному курсі електричних машин.

Головними елементами конструкції трансформатора є магнітопровід — це магнітне коло, і розміщені навколо обмотки — первинної і вторинної — це два електричні кола. Первинна обмотка вмикається до джерела змінного струму (до звичайної електромережі) і споживає змінний намагнічуючий струм, створюючи змінний (пульсуючий) магнітний потік. Цей потік, перетинаючи вторинну обмотку, згідно з виразом (1) індукуює в ній, під дією ввімкненого навантаження виникає струм, який трансформується назад у первинну обмотку. Оскільки параметри однієї і другої обмоток різні, то в процесі трансформації змінюються величини напруги і струму.

Електрична машина складається з двох основних частин: нерухомої, що називається статором, і тієї, що обертається, яка називається ротором. Статор і ротор, розділені повітряним зазором, складають магнітне коло і кожний з них має обмотку. Тому машина теж має два електричні кола.

У трифазній асинхронній машині обмотка статора складається з трьох однакових фаз, зміщених по колу на 120° . Ця обмотка вмикається у трифазну мережу і по ній тече трифазний струм. Наявність двох факторів — просторового зсуву фаз на 120° і часового струмів фаз теж на 120° — забезпечує обертання магнітного поля, створеного обмоткою статора. Швидкість або частота обертання цього поля

$$n_c = \frac{60f}{p}, \quad (3)$$

де f — частота напруги мережі і p — число пар полюсів обмотки, називають синхронною частотою обертання n_c . Обмотка ротора, що складається із стержнів, розташованих у пазах, і замкнена з двох боків кільцями, конструктивно подібна до білячої клітки. При обертанні магнітне поле статора перетинає обмотку ротора і згідно з (1) наводить в ній ЕРС, під дією якої по провідниках обмотки ротора тече струм, а згідно з (2) виникають сили, які створюють обертаючий момент, направлений у бік обертання поля. Якщо цей момент більше ніж гальмування, то зворотне магнітне поле тягне за собою ротор і забезпечує його розгін. Але якщо механічна швидкість обертання ротора досягне синхронної швидкості обертання поля, останнє перестане переміщуватись відносно ротора, зникають: ЕРС згідно з (1), струм (за законом Ома), сила (згідно з (2)) і, в кінцевому підсумку, зворотний момент. Внутрішній гальмовий момент завжди залишається (тертя в підшипниках, опір повітря вентилятора і т. ін.), примушуючи ротор відставати від магнітного поля. Оскільки в такому двигуні частота обертання принципово не може стати синхронною (у цьому випадку зникне взаємодія між статором і ротором), двигун називають асинхронним.

У машині постійного струму до внутрішньої поверхні станини прикріплюють головні полюси; навколо яких розміщені котушки, з'єднані між собою, які складають обмотку збудження. По обмотці збудження проходить постійний струм, що викликає появу в магнітному колі основного магнітного потоку. В пазах обертаючої частини, що називається якорем, розміщена обмотка якоря, секції якої приєднані до колектора. Колектор обертається разом

з якорем. Нерухомі щітки, що притиснуті до колектора, забезпечують з'єднання обертаючого кола обмотки якоря зовнішнім електричним колом — джерелом або споживачем постійного струму. Якщо до якоря приєднати джерело, то по обмотці якоря потече струм, взаємодія якого з основним магнітним потоком викликає згідно з (2) електромагнітні сили, що створюють зворотний момент і забезпечують обертання якоря. Якщо якір обертати іншим двигуном, то в обмотці якоря згідно з (1) наводиться ЕРС, яка крізь колектор і щітки може живити споживача. Відповідно до (1) ЕРС і струм в обмотці якоря виходять змінними. Обертаючий колектор разом з нерухомими щітками забезпечує перетворення змінних ЕРС і струму в постійне або зворотне перетворення. Саме завдяки колектору електрична машина стає машиною постійного струму. Обертання якоря може супроводжуватись іскрінням між щітками і колектором. Для запобігання іскріння на статорі є додаткові полюси, обмотка яких вмикається послідовно з обмоткою якоря.

ОПИСАННЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Основними частинами стенда є вертикальна панель, що складається з блоків і розташована між двома горизонтальними полицями. Збоку стенда на окремій підставці розташовані об'єкти дослідження. Каркаси стенда виконано з гетинаксу, полиці — з дерев'яних плит, із зовнішнього боку все вкрито світлим пластиком.

Об'єктами дослідження є асинхронна машина, машина постійного струму, ротори яких механічно жорстко зв'язані, а також трифазний трансформатор з такими номінальними параметрами:

електродвигун постійного струму серії 2П,
 $P_n=1,2$ кВт, $U_n=340$ В, $I_{ан}=4,23$ А, $n_n=3150$ об/хв, $U_{вн}=220$ В;
 двигун асинхронний серії 4А,

$P_n=3,0$ кВт, Δ/Y , $U_n=220/380$ В, $I_{вн}=10,6/6,1$ А, $n_n=2820$ об/хв, $\eta_n=84,5\%$,
 $\cos \varphi =0,88$, ($U_n=220$ В, $I_{фн}=6,1$ А);

трансформатор трифазний серії ТСЗІ,
 $S_n=1,6$ кВт, обмотка А, В, С: Y/Δ , $U_n=220/380$ В ($U_{фн}=220$ В),
 обмотка а, в, с: Y/Δ , $U_n=220/127$ В ($U_{фн}=127$ В),

Номінальний фазний струм обмоток знаходять так:

$$I_{фн} = \frac{S_n \cdot 10^3}{3U_{фн}} \text{ (А)}$$

На блоках лицьової панелі зображено електричні схеми об'єктів досліджень. Кінці обмоток цих об'єктів приєднані до клем, які сполучені із схемами. В електричні кола вмонтовані і з'єднані із схемами різні перемикачі й вимикачі, за допомогою яких проводяться необхідні зміни у схемах. Така компоновка забезпечує наочність і розуміння виконуваних операцій, які повинні глибше усвідомлюватися і краще запам'ятовуватися.

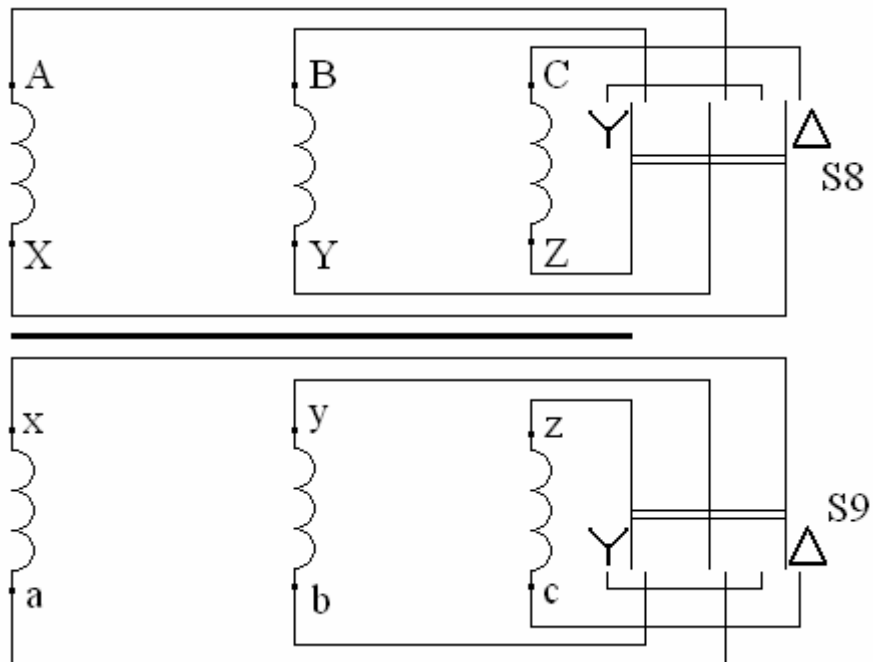


Рис. 1 — Трифазний двообмотковий трансформатор

На блоках лицьової панелі розміщено також клеми і вимикачі, за допомогою яких підводять електроживлення до схем, реостаті з плавним регулюванням опорів, щитові вольтметри і амперметри. Нижня полиця править за робочий стіл, крім того, на ній знаходиться комплект К-50 для вимірювання напруги, струму і потужності в трифазному колі. На верхній полиці розташовано реостати із ступеневим регулюванням опори, а також електронний цифровий тахометр для вимірювання частоти обертання. Далі наводяться основні фрагменти електричних полів, зображених на лицевій панелі. Трифазні перемикачі S7, S8 і S9, зображені на рис.1 з'єднують обмотки трансформатора або асинхронного двигуна Δ або Y.

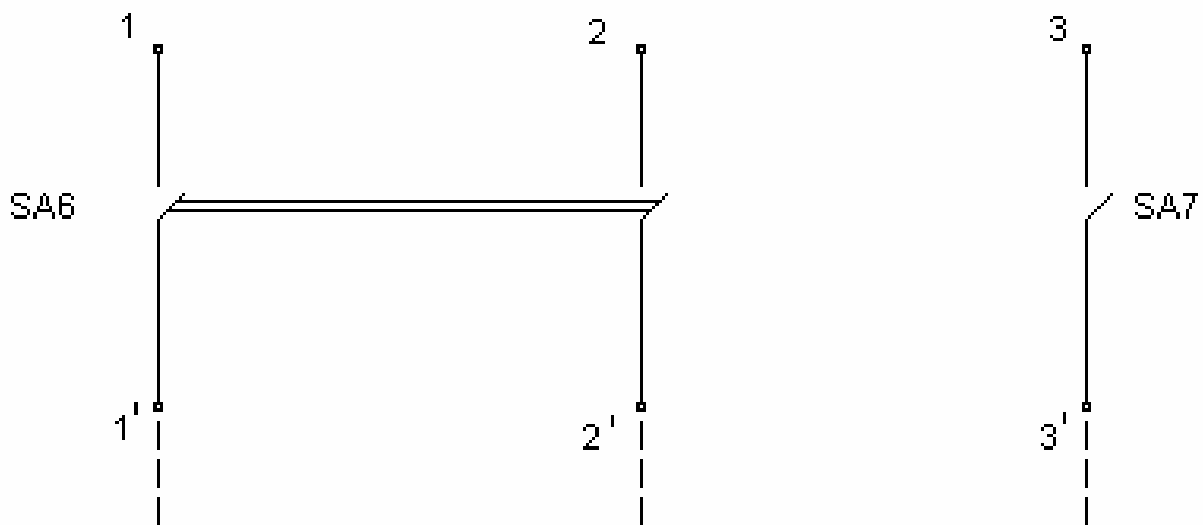


Рис. 2 — Загальна лінія двох стендів

У середньому положенні перемикачів обмотки розімкнені. Головним електричним колом машини постійного струму є обмотка якоря, кінці якої позначаються Я1 і Я2 (рис. 3). З нею послідовно з'єднано обмотку додаткових полюсів (Д1 і Д2). У колі якоря ввімкнено також амперметр А1, що слугує для вимірювання струму якоря I_a , і реостат K_{np} , опір якого регулюється вимикачами SA0–SA5. Перемикачем S1 коло якоря або приєднується до мережі постійного струму (положення М), що відповідає схемі двигуна, або замикається без джерела (положення G), що відповідає генераторній схемі. Опір K_{np} слугує для обмеження струму якоря при реостатному пуску двигуна і для регулювання напруги на затискачах якоря U_a , або як електричне навантаження генератора постійного струму.

Якщо обмотка збудження живиться від мережі постійного струму (незалежне збудження) або вмикається до затискачів якоря, де звична напруга сумірна з мережею (паралельне збудження), вона називається шунтовою (паралельною) обмоткою і маркується Ш1–Ш2 (рис. 3,4,5). Таку обмотку виготовляють з тонкого дроту з великою кількістю витків, і вона має високий опір (сотні Ом). Перемикачем S2 можна встановити тип збудження. Перемикач S3 дозволяє змінювати опір шунтової обмотки у 4 рази. Змінювати напрямок струму (полярність) можна перемикачем S4. Реостат R_{per} і амперметр А2 дозволяють змінювати і вимірювати струм збудження I_b , (або струм підживлення I_n обмотки додаткових полюсів Д1–Д2), що визначається перемикачем S5. Схема машини постійного струму зібрана, а необхідні зміни виконуються згаданими перемикачами. Перемикач S6 (рис.6) призначено для використання тих самих реостатів або в колі машини постійного струму, або в трифазних колах. Кожні два стенди (1 і 2, 3 і 4), що мають спільні клеми 1', 2', 3' використовують у спільній роботі агрегатів обох стендів (рис. 7).

На щитових приладах має бути або реальне градуювання, або вказані гранична вимірювана величина і вид струму. Вони також повинні забезпечуватись перемикачами для вимірів межі вимірювання, виду струму або для використання у різних схемах. Для деяких вольтметрів мають бути довгі дроти зі щупами для вимірювання різних напруг у схемі.

Для запобігання пошкодженням вольтметрів треба починати вимірювання на великих межах, а якщо показання невеликі, переходити на менші межі. Потрібно також строго стежити, щоб положення перемикача виду струму відповідало виду струму вимірюваної величини, інакше показання можуть бути відсутніми, що також загрожує пошкодженням.

Вимірювання за допомогою К-50 має свої особливості. Наприклад, якщо лінійна напруга $U_{\text{л}}=220$ В, а фазні елементи з'єднані Δ і $U_{\text{ф}}=U_{\text{л}}=220$ В, вольтметр К-50 однак буде показувати 127 В. Тому домовимось додержувати ряд вимог з урахуванням величини напруги мережі, особливостей показань, безпеки К-50 і зручності вимірювань:

1. Перемикач межі напруги завжди встановлюється на позначці 150 В і не перемикається.

2. Перемикач межі струму α_i до вмикання схеми встановлюється на позначці 50А, а після вмикання переводиться на позначку, вказану в таблиці, а якщо її немає, встановлюється так, щоб показання амперметра були найбільшими в межах шкали.

3. Показання V, A і W для усіх трьох фаз записують в таблицю тільки в поділках.

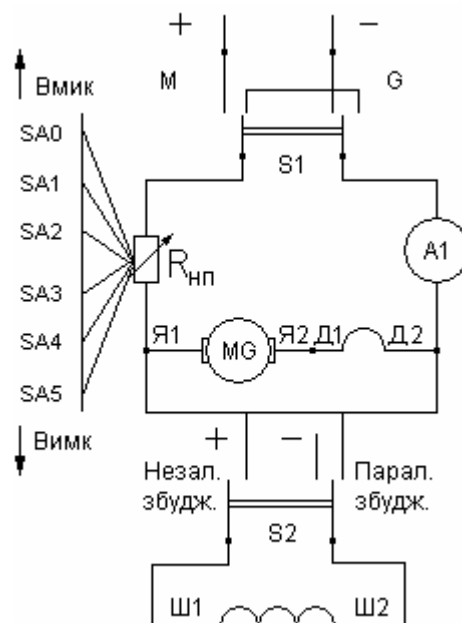


Рис. 3 — Електричні ланцюги машин постійного струму

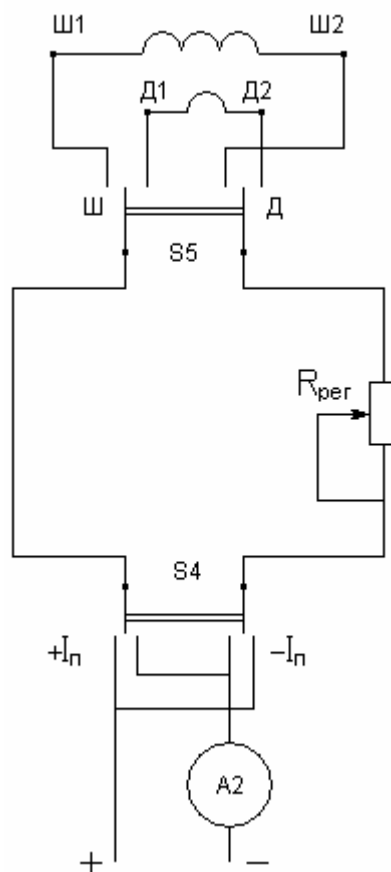


Рис. 4 — Ланцюг шунтової або додаткової обмоток

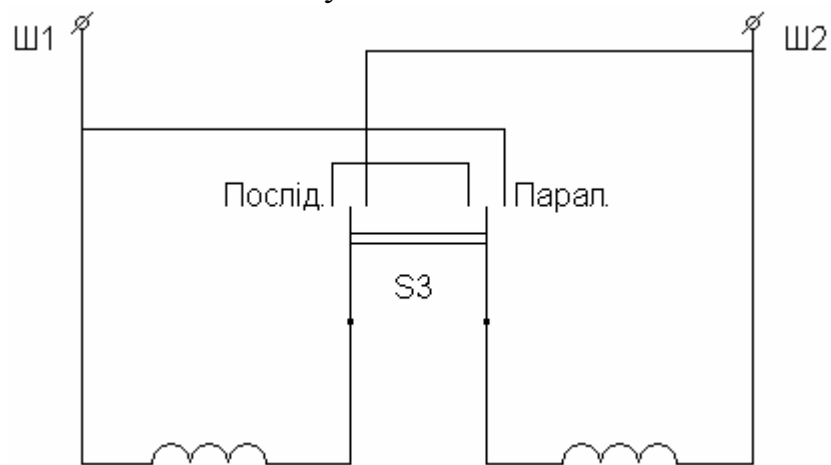


Рис. 5 — Полісні котушки шунтової обмотки збудження

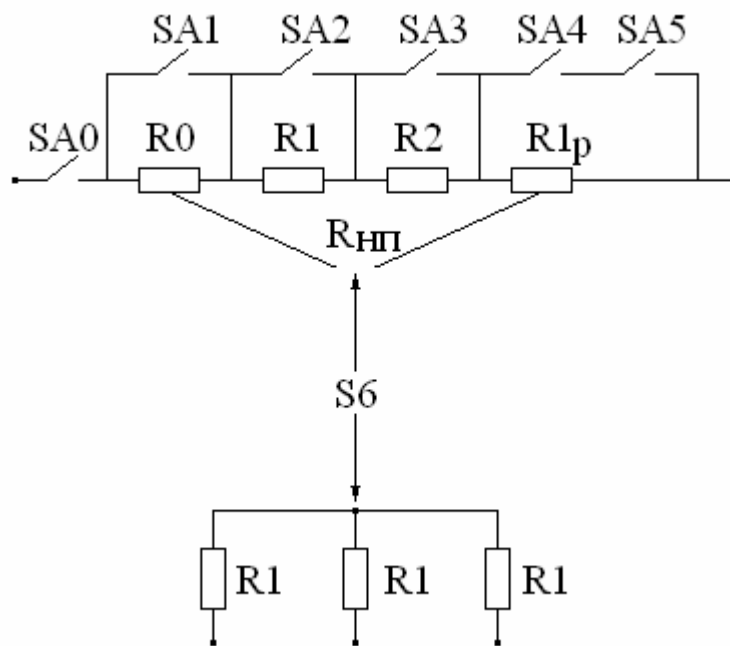


Рис. 7 — Навантажувально-струмообмежувальні реостати

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ХОЛОСТИЙ ХІД І КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи — засвоїти один з основних інструментів дослідження трансформатора — схему заміщення. Студенти повинні навчитися обережно і правильно проводити досліди холостого ходу і короткого замикання, виконувати обробку результатів досліджень і розуміти фізичний зміст обчислених параметрів. Схеми проведення цих дослідів подано на рис. 8, 9, а на рис. 10 наведено схеми заміщення.

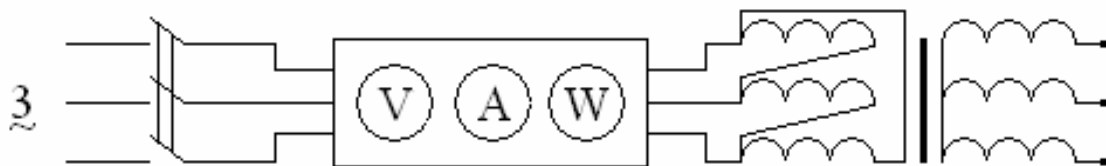


Рис. 8 — Дослід холостого ходу трансформатора

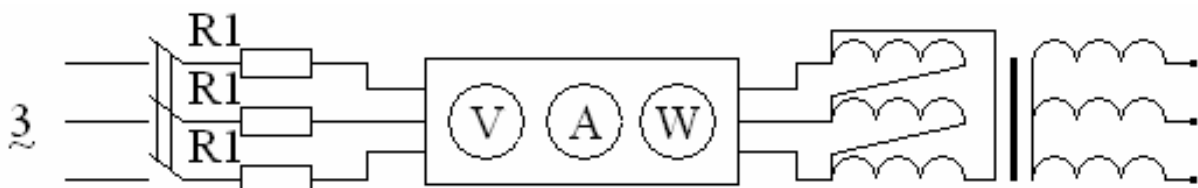


Рис. 9 — Дослід короткого замикання трансформатора

1.1. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Зібрати схему і провести дослід холостого ходу, вважаючи первинною обмотку високої напруги (затискачі А, В і С).
2. Зібрати схему і провести дослід холостого ходу, вважаючи первинною обмотку низької напруги (затискачі а, в і с).
3. Зібрати схему і провести два аналогічних дослід короткого замикання.
4. По кожному з дослідів обчислити всі необхідні електричні й магнітні параметри.

1.2. КОРОТКІ ПОЯСНЕННЯ

У трансформаторі об'єднано два електричні кола — первинної і вторинної обмоток, а також одне спільне магнітне коло, чим зумовлюється взаємодуктивний зв'язок між обмотками. Як відомо з курсу ТОЕ, такі кола вважаються досить складними і їх розрахунок викликає труднощі.

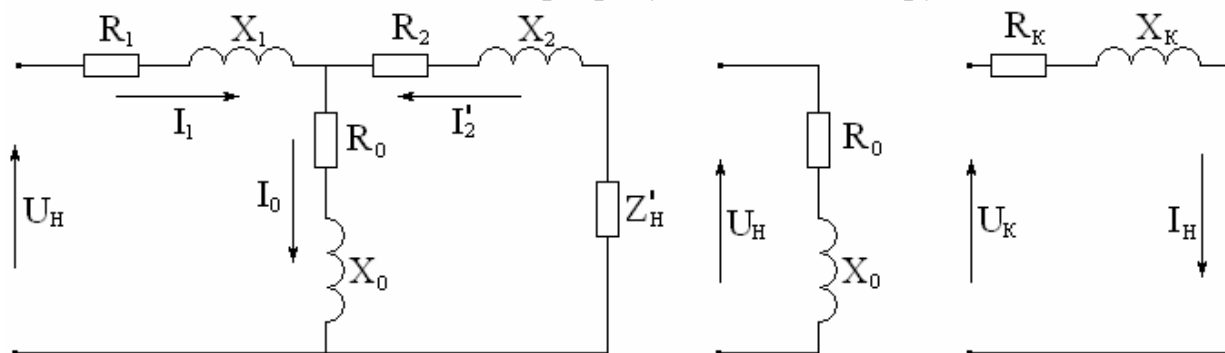


Рис. 10 — Схеми заміщення трансформатора

а) з навантаженням;

б) при холостому ході;

в) при К.З.

Найбільш відомий шлях полегшення розрахунку — об'єднання двох електричних кіл в одне загальне коло і еквівалентна заміна магнітних процесів електричними. Такий шлях можна обрати тільки для зведеного трансформатора, в якого кількість витків вторинної обмотки умовно замінюється кількістю витків первинної обмотки ($W_1 = W_2$), внаслідок чого вирівнюються ЕРС ($E_2' = E_1$), індуковані основним магнітним потоком, який замикається по феромагнітному магнітопроводу, та й решта параметрів (струми, опори) вторинної обмотки стають близькими до відповідних параметрів первинної обмотки.

Рівняння рівноваги напруг у комплексній формі, складені за другим законом Кірхгофа для первинної і зведеної вторинної обмоток, такі:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_1 + j \dot{I}_1 X_1; \\ \dot{E}_2' &= \dot{U}_2' + R_2' \dot{I}_2' + j \dot{I}_2' X_2'.\end{aligned}\quad (5)$$

Рівняння рівноваги магніторушійних сил ($\dot{I}_1 W_1 + \dot{I}_2 W_2 = \dot{I}_0 W_1$) після

зведення перетворюється в рівняння рівноваги струмів, що відповідає першому закону Кірхгофа:

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \quad (6)$$

Замінивши $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2 = -j(R_0 + jX_0)\dot{I}_0$ і $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_n$ в результаті синтезу трьох рівнянь одержуємо електричну схему, показану на рис. 10.

Важливість схеми заміщення полягає в тому, що вона дозволяє кількісне дослідження різних процесів у трансформаторах замінити розрахунком простого електричного кола. У цій схемі:

R_1 і R'_2 — активний опір відповідно первинної і зведеної вторинної обмоток;

X_1 і X'_2 — індуктивний опір, зумовлений магнітними потоками розсіювання тих же обмоток;

X_0 — індуктивний опір, зумовлений основним магнітним потоком;

R_0 — активний опір, електричні втрати в якому дорівнюють магнітним втратам в осерді трансформатора;

Z'_n — зведений опір споживачів.

Трансформація здійснюється основним магнітним потоком, тому що він перетинає контури всіх витків обох обмоток. Потоки розсіювання — $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ замикаються навколо витків тільки власної обмотки або у більшості випадків через повітря і не беруть участь у трансформації. Оскільки магнітний опір немагнітного середовища значно більший, ніж сталевих магнітопроводу, то потоки розсіювання складають лише кілька процентів від основного потоку.

У режимі холостого ходу (х.х.), коли коло вторинної обмотки розімкнене (споживачі відімкнені), споживний струм є найменшим. Тому дослід холостого ходу, в принципі безпечний, проводиться за повної робочої, тобто номінальної напруги. ЕРС, що індукується основним магнітним потоком, приблизно дорівнює прикладеній напрузі мережі:

$$E_1 = 4,44 f_1 W_1 \Phi_0 \approx U_1. \quad (7)$$

Тому $\Phi_0 \approx U_1$, (величина магнітного потоку визначається прикладеною напругою) і в досліді х.х. будуть відтворені номінальні магнітні умови. Електричні ж умови, визначені величиною струму (у вторинній обмотці його немає зовсім, а в первинній він номінальний), одержуються значно послабленими. Тому $X_0 \gg X_1$ і $R_0 \gg R_1$ у схемі заміщення досліді х.х. (рис. 8) за усіх залишених опорів можна врахувати тільки r_0 і x_0 . Звідси висновок, що в досліді х.х. практично залишаються лише номінальні магнітні втрати (або втрати в сталі P_0), які дорівнюють показанням ватметра.

Слід підкреслити дві особливості режиму х.х. — наявність несиметрії і нелінійності струму I_0 , який за відсутністю навантажувального струму витрачається на утворення основного магнітного потоку Φ_0 і тому є намагнічуючим, індуктивним струмом. Проте за наявність втрат у сталі I_0 містить невелику активну складову.

За магнітним законом Ома маємо:

$$\Phi_0 = \frac{I_0 W_1}{R_m}. \quad (8)$$

Напруга мереж і є симетричною, тому Φ_0 всіх трьох фаз однакові. Проте магнітопровід середньої фази (фаза В) складається тільки із стержня, а в двох інших фазах до стержнів додають ярма. Тому магнітний опір R_m , а також струм I_0 фази В менші, ніж у двох інших фазах.

Крім того, R_m не є постійним і дуже залежить від насичення. Якщо при номінальній напрузі магнітопровід нормально насичений, то навіть при порівняно невеликому збільшенні напруги, а тому і Φ_0 , може значно зростати R_m і I_0 . Навпаки, невелике, наприклад, у $\sqrt{3}$ рази зменшення напруги викликає багаторазове зменшення I_0 .

При к.з. еквівалентний опір схеми заміщення різко зменшується, а струми обмоток можуть у десятки разів перевищувати номінальні значення. Тому за номінальної напруги к.з. виявляється аварійним. Щоб забезпечити дослід к.з. і одночасно відтворити номінальні електричні умови, напругу, підведену до короткозамкнутого трансформатора, знижують до такої величини, при якій струми обмоток стануть номінальними. Таку напругу називають напругою короткого замикання і позначають U_k . Це дуже важлива величина, що дозволяє обчислити величину струму при аварійному короткому замиканні $I_{кз}$:

$$I_{кз} = I_n \frac{U_n}{U_k}. \quad (9)$$

Від величини U_k залежить зміна вторинної напруги при зміні навантаження, коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора, при паралельній роботі трансформаторів однакової потужності висувають вимогу їх рівності U_k . Звичайно U_k знаходять у %:

$$U_k \% = \frac{U_n}{U_k} \cdot 100\%,$$

і наводять у паспорті поряд з іншими номінальними параметрами.

У досліді к.з. напруга у десятки разів менше номінальної, у стільки ж разів слабкіший магнітний потік. Намагнічуючий струм і магнітні втрати виявляються незначними, їх не враховують. Тому в схемі заміщення (рис. 8) можна виключити вітку з опорами R_0 і X_0 вона стане такою, як показано на рис. 10.

При к.з. вихідна потужність $P_{вих}=0$, тому що $U_{вих}=0$ (при х.х. $P_{вих}=0$ за рахунок $I_{вих}=0$). Тому вхідна потужність, яку показує ватметр, і при х.х. і при к.з. виявляється втратами. У зв'язку з тим, що при к.з. магнітні процеси дуже ослаблені, а електричні номінальні, покази ватметра у досліді к.з. дорівнюють номінальним електричним втратам або номінальним втратам в міді обмоток (так їх називають, хоча обмотки трансформатора можуть бути виготовлені з алюмінію).

1.3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ.

1.Перемикачами S8 і S9 фази обох обмоток трансформатора вмикаємо трикутником Δ . Затискачі трифазної мережі з'єднано зі входом вимірювального комплексу, а його вихід — із затискачами А, В, С трансформатора. Затискачі а, в, с, повинні бути розімкнені. Вмикаємо напругу і заповнюємо табл. 1. Записуємо струмковий перемикач α_i К-50.

Таблиця 1 - Дослід холостого ходу

Вхід		Покази К-50										Вихід		
затискачі	схема	α_i	U_A	I_A	P_A	U_B	I_B	P_B	U_C	I_C	P_C	U_{ax}	U_{by}	U_{cz}
А, В, С	Δ													

Тут U_{ax} , U_{by} , U_{cz} — фазні напруги.

2. Розраховуємо параметри холостого ходу, користуючись формулами обробки показань вимірювального комплексу і схемою заміщення трансформатора. Результати записуємо до табл. 2.

Таблиця 2 - Параметри холостого ходу

Вихідні затискачі	$U_{л0}$	$I_{л0}$	P_0	$\cos \varphi_0$	$U_{фвх0}$	$I_{ф0}$	Z_0	R_0	X_0	I_0	$U_{фвих0}$	К
	В	А	Вт	—	В	А	Ом	Ом	Ом	%	В	
А, В, С												

$$\text{Тут } I_0 \% = \frac{I_{\phi 0}}{I_{\phi n}} \cdot 100\% ; U_{фвих} = \frac{U_{ax} + U_{by} + U_{cz}}{3} ; K = \frac{U_{фвх0}}{U_{фвих0}} .$$

3. При проведенні дослідного к.з. між живильною мережею і обмоткою трансформатора вмикаємо опори 1, величина яких підібрана таким чином, щоб струми не дуже відрізнялись від номінальних.

Перемикач S6 переводимо в нижнє положення, а S8 і S9 у положення Y. Три затискачі мережі приєднуємо до верхніх затискачів R1, а нижні затискачі R1 — до вхідних затискачів вимірювального комплексу. Вихідні затискачі К-50 з'єднуємо із затискачами А, В, С трансформатора, а затискачі а, в, с останнього закорочуємо двома металевими пластинками. Подаємо напругу, заповнюємо табл. 3. Напруги малі, вимірюємо їх окремо низьковольтним вольтметром.

Таблиця 3 - Дослід короткого замикання

Вхід		Покази К-50									Вихід		
затискачі	схема	α_i	I_A	P_A	I_B	P_B	I_C	P_C			U_A	U_B	U_C
А, В, С	Y												

4. Обробку результатів дослід к.з. проводимо так, як і для дослід х.х. Результати зводимо до табл. 4.

Таблиця 4 - Параметри короткого замикання

Вхідні затискачі	$U_{лк}$	$I_{лк}$	P'_k	$\cos \varphi_k$	$U_{фк}$	$I_{фк}$	Z_k	R_k	X_k	P_k	U_k	U_k	$U_{ка}$	$U_{кр}$
	В	А	ВТ	—	В	А	Ом	Ом	Ом	Ом	В	%	В	В
А, В, С														

Тут: $U_{л} = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}$; $P_k = 3R_k I_{фн}^2$; $U_k = U_{фк} \frac{I_{фн}}{I_{фк}}$; $U_k \% = \frac{U_k}{U_{фн}} \cdot 100\%$;

$$U_{ка} \% = U_k \% \cos \varphi_k; U_{кр} \% = U_k \% \sin \varphi_k$$

Оскільки у процесі введення вторинна обмотка виявляється майже такою ж, як і первинна, то при живленні обмотки АВС:

$$R_k = R_1 + R'_2; R_1 \approx R'_2 \approx \frac{R_k}{2}; R_2 = \frac{R'_2}{K^2}.$$

Аналогічні міркування справедливі як для індуктивних, так і для повних опорів. Розрахувавши опори, зводимо їх до табл. 5.

Таблиця 5 - Опір обмоток

Вхідні затискачі	$Z_{к1}$	$R_{к1}$	$X_{к1}$	$Z_{к2}$	$R_{к2}$	$X_{к2}$
А, В, С						

1.4. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Зобразити повну схему заміщення трансформатора і розповісти про її призначення.

2. Яким рівнянням відповідає повна схема заміщення?

3. Пояснити фізичне значення всіх опорів схеми заміщення.

4. Пояснити специфіку досліду холостого ходу, зобразити і обґрунтувати схему заміщення холостого ходу.

5. Підкреслити різницю між аварійним і дослідним коротким замиканням трансформатора і сформулювати, що таке напруга короткого замикання?

6. Обґрунтувати схему заміщення трансформатора при короткому замиканні.

7. Чому в дослідах холостого ходу і короткого замикання ватметр показує втрати потужності?

8. Чому при холостому ході магнітні втрати номінальні, а електричними втратами нехтують?

9. Чому при короткому замиканні електричні втрати номінальні, а магнітними втратами нехтують?

10. Порівняти величини фазних або лінійних струмів при холостому ході і пояснити їх відмінності.

11. Співставити струм і потужність при живленні обмотки АВС у режимі холостого ходу, якщо переключити її з Δ на Y . Як пояснити різке їх зменшення?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА З НАВАНТАЖЕННЯМ

Мета роботи — експериментальна перевірка основних характеристик трансформатора з навантаженням — процентних змін напруги і ККД, одержаних розрахунковим шляхом. Електричну схему навантаженого трансформатора наведено на рис. 11. Замість опорів R1 як споживач може бути ввімкнений асинхронний двигун (за рекомендацією викладача).

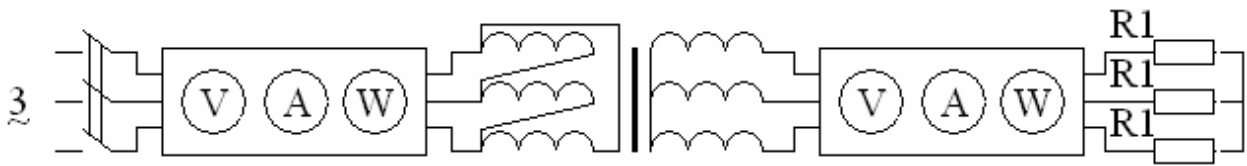


Рис. 11 — Трансформатор з навантаженням

2.1. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Зібрати схему і провести дослід режиму навантаження, вважаючи первинною обмотку вищої напруги (затискачі А, В, С).
2. За даними дослідів знайти процентну зміну вихідної напруги $\Delta U\%$ і η — коефіцієнт корисної дії.
3. Розрахунковим шляхом знайти споживаний струм, $\Delta U\%$, η і порівняти одержані результати.

2.2. КОРОТКІ ПОЯСНЕННЯ

При холостому ході напруга на виході трансформатора U_{20} дорівнює величині ЕРС, що індукується на вторинній обмотці. При навантаженні з'являється струм, у трансформаторі виникає падіння напруги і на виході напруга, як правило, зменшується:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%; \quad (10)$$

де U_2 — вихідна напруга при навантаженні. Вимірювши U_{20} і U_2 при навантаженні, за допомогою наведеної формули можна визначити $\Delta U\%$. Цю величину можна також розрахувати за формулою, в якій електрична схема трансформатора є єдиним внутрішнім опором короткого замикання Z_k :

$$\Delta U\% = \beta(U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2), \quad (11)$$

де $\beta = I_2 / I_{2n}$ — коефіцієнт навантаження, а U_{ka} і U_{kp} знаходять у попередній лабораторній роботі. Якщо навантаженням є чисто активні опори R1, то $\varphi_2 = 0$,

а споживний струм легко знайти за законом Ома:

$$I_{1\phi} = \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{(R_k + R_1)^2 + X_k^2}}, \quad (12)$$

де R_k і X_k знову беруть за даними попередньої роботи.

ККД дорівнює відношенню вихідної активної потужності до вхідної і може бути визначений в досліді під навантаженням:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (13)$$

Якщо η передати через втрати, то

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta \sin \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \quad (14)$$

де P_0 і P_k — номінальні втрати у сталі й міді — знову ж таки визначаються в попередній роботі. Таким чином, при великій потужності трансформаторів, коли проведення режиму навантаження в багатьох відношеннях викликає великі труднощі, зробити оцінку навантажувальних характеристик можна за допомогою «легких» режимів — холостого ходу і дослідного короткого замикання. Крім того, при користуванні формулою (14) значно менше позначаються похибки вимірювань, ніж у (13).

2.3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Обмотку із затискачами А,В,С, перемикачем S8 з'єднуємо Δ , а обмотку а, в, с, перемикачем S9 з'єднуємо Y . До кінця роботи ці схеми залишаються без змін. Складаємо схему за рис. 11, увімкнувши К-50 між мережею живлення і затискачами АВС. Подаємо напругу, а результати вимірів заносимо до табл. 6.

Таблиця 6 - Вхідне коло

Затискачі	Покази К-50									
	α_i	U _A	I _A	P _A	U _B	I _B	P _B	U _C	I _C	P _C
А, В, С										

2. За результатами обчислення показань К-50 знаходимо фазний струм $I_{1\phi}$ і споживану потужність P_1 які заносимо до табл. 7.

Таблиця 7 - Вхідні параметри

Затискачі	$I_{1\phi}$, А	P_1 , Вт
А, В, С		

3. Складаємо схему за рис. 11, увімкнувши К-50 між затискачами а, в, с і опором R1, а живлення підводимо до А, В, С. Подаємо напругу і записуємо всі

покази К-50 до табл. 8. Потім вимикаємо живлення, від'єднуємо опір R1 (режим х.х.) і заносимо до табл. 8 U_{AO} , U_{BO} , U_{CO} .

Таблиця 8 - Вихідне коло

Затискачі		Покази К-50												
Вхідні	Вихідні	Навантаження										Холостий хід		
		α_i	U _A	I _A	P _A	U _B	I _B	P _B	U _C	I _C	P _C	U _{A0}	U _{B0}	U _{C0}
A, B, C	а, в, с													

4. За формулами обробки К-50 заповнюємо табл. 9.

Таблиця 9 - Вихідні параметри

Затискачі		$U_{2л}$, В	$U_{2л0}$, В	I_{ϕ} , А	P_2 , Вт
Вхідні	Вихідні				
A, B, C	a, b, c				

5. Дослідні параметри розраховуємо за формулами (10), (13) і беремо в табл. 7 (I_{ϕ}). Розраховуємо їх за формулами (11), (12) і (14). Результати зводимо до табл. 10.

Таблиця 10 - Порівняння параметрів навантаження

Затискачі		η		ΔU , %		$I_{1\phi}$, А	
Вхідні	Вихідні	Розрах.	Дослід	Розрах.	Дослід	Розрах.	Дослід
A, B, C	a, b, c						

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке коефіцієнт корисної дії?
2. Розкажіть про прямий спосіб визначення ККД і через втрати?
3. Від яких параметрів залежить ККД?
4. Що таке процентна зміна напруги?
5. Яка залежність ККД від навантаження?
6. Якими способами можна знайти $\Delta U\%$?
7. Від чого залежить $\Delta U\%$?
8. Що таке зовнішня характеристика трансформатора, який вона має вигляд?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ПЕРЕВІРКА МАРКУВАННЯ І ГРУП СПОЛУЧЕННЯ ОБМОТОК ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Метою роботи є експериментальна перевірка справедливості маркування і відповідності номера групи обмоток. Студенти повинні знати принцип маркування обмоток, фактори, що впливають на номер групи, вміти будувати векторні діаграми і встановлювати номер групи.

3.1. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Вимірюючи фазні й лінійні напруги з однофазним живленням, зробити висновок про правильність маркування.

2. Вимірюючи фазні напруги з трифазним живленням, побудувати векторні діаграми для заданих схем з'єднання обмоток і визначити номер групи.

3. Вимірюючи контрольні напруги, порівняти їх зі знайденими за діаграмою і підтвердити справедливість номера групи.

3.2. КОРОТКІ ПОЯСНЕННЯ

Якщо в обмотках трансформатора, з'єднаних за схемою Y/Y , живити одну фазу, наприклад, АХ, ЕРС у всіх фазах будуть збігатися у часі. Тому лінійні ЕРС будуть дорівнювати сумі або різниці фазних ЕРС. Магнітний потік, проходячи крізь стержень фази АХ, потім розгалужується на два інші стержні у протилежному напрямку. Тому: $E_{AX}=E_{BY}+E_{CZ}$; $E_{AB}=E_{AX}+E_{BY}$; $E_{AC}=E_{AX}+E_{CZ}$; $E_{BC}=E_{BY}-E_{CZ}$. Крім того, $E_{BY}>E_{AX}/2>E_{CZ}$ оскільки стержень фази ВУ коротший за стержень інших фаз, до яких додаються осердя. Такі самі співвідношення справедливі для обмоток із затискачами а, в, с. Наведені співвідношення є критеріями правильності і відповідності маркування, якщо воно невідоме, або з якихось причин переплутане.

Група з'єднання визначається кутом зсуву фаз між відповідними лінійними ЕРС первинної (АВС) і вторинної (авс) обмоток. Для визначення групи будуємо векторну діаграму ЕРС таким чином. Спочатку рисуємо схему з'єднання обмоток і стрілками вказуємо напрямки фазних ЕРС (від Х до А, від У до В і т.д.). Вибираємо масштаб і рисуємо зірку фазних ЕРС первинної і вторинної обмоток, зміщуючи вектори фаз АВС на 120° за годинниковою стрілкою. Поряд будуємо сполучену точку Аа. Йдемо за схемою від А до В. Якщо стрілки фазних ЕРС збігаються з напрямком руху, то їх вектори відкладаємо у тому ж напрямку (паралельно), що й на різці. Якщо стрілка направлена проти руху, то відповідну фазну ЕРС відкладають у протилежному напрямку. Аналогічно одержуємо точки В, С, с. Вибираємо два однойменні вектори лінійних ЕРС, наприклад, АВ і ав, уявно ставимо циферблат годинника в точці Аа цифрою 0 (або 12) на лінії АВ. Вважаємо АВ хвилиною стрілкою, ав — годинниковою. Час, який показує при цьому годинник, і є номером групи. Номер групи необхідно для визначення можливості вмикання трансформаторів на паралельну роботу.

3.3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Поставимо перемикачі S8 і S9 у положення Y, до затискачів AX підведемо живлення від мережі змінного струму, Подаємо напругу, вольтметром із щупами вимірюємо напругу і заносимо результат до табл. 11 (у вольтах).

Таблиця 11 - Однофазні живлення

U_{AX}	U_{BY}	U_{CZ}	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{ax}	U_{by}	U_{cz}	U_{ab}	U_{bc}	U_{ca}

2. За даними табл. 11 знаходимо відношення, наведене у попередньому пункті, і робимо висновок про правильність маркування.

3. До затискачів ABC підводимо живлення від трифазної мережі. З'єднуємо точки A і a. Перемикачами S8 і S9 встановлюємо потрібну схему обмоток, подаємо напругу і заповнюємо перший рядок у графі «Виміряно» табл. 12. Потім вимикаємо живлення, встановлюємо іншу схему обмоток, подаємо напругу, заповнюємо другий рядок і т.д.

Таблиця 12 - До визначення і перевірки номера групи

Схема обмоток	Виміряно								Знайдено		
	U_{AX}	U_{BY}	U_{CZ}	U_{ax}	U_{by}	U_{cz}	U_{Bb}	U_{Cc}	№ гр.	U_{Bb}	U_{Cc}
Y/Y											
Y/ Δ											
Δ /Y											
Δ / Δ											

За даними табл. 12 для кожної схеми обмоток у масштабі будуюмо векторні діаграми і заповнюємо графу «Знайдено».

Порівнюємо виміряні і знайдені U_{Bb} і U_{Cc} , і робимо висновок про правильність визначення номера групи.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть відношення, використані для перевірки маркування.
2. Чим визначається група з'єднання обмоток?
3. Як будують векторну діаграму?
4. Як і для чого користуватися циферблатом годинника?
5. Скільки існує груп і як їх одержати?
6. Для чого потрібно знати номер групи?

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи — вивчити властивості трансформаторів при їх паралельному вмиканні на загальне навантаження. Студенти повинні практично закріпити знання умов вмикання на паралельну роботу, вміти перевірити ці умови, вмикати і оцінювати розподіл навантаження між трансформаторами. Схема паралельного вмикання трансформаторів наведена на рис. 12.

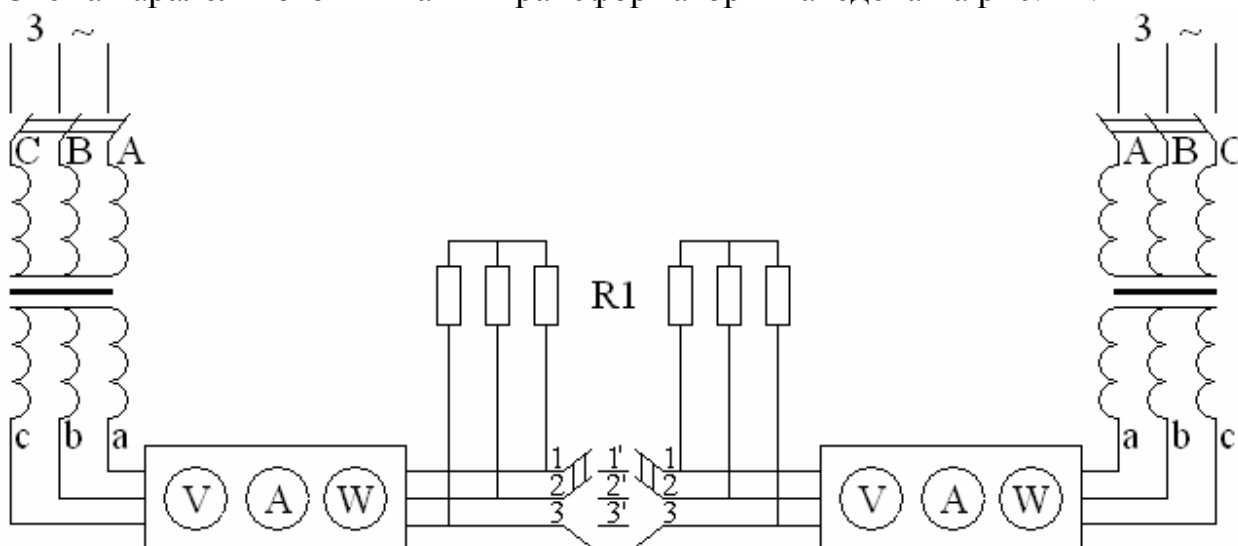


Рис. 12 — Паралельна робота трансформаторів

4.1. ПРОГРАМА РОБОТИ

1. Перевірити можливість вмикання двох трансформаторів на паралельну роботу і розрахувати передбачену величину зрівняльного струму.
2. Увімкнути трансформатори на паралельну роботу без навантаження, виміряти і порівняти з розрахунковими зрівняльними струми.
3. Підключати навантаження, виміряти струми при роздільній і паралельній роботі трансформаторів. Побудувати векторну діаграму струмів при паралельній роботі трансформаторів, порівняти одержані значення з виміряними.

4.2. КОРОТКІ ПОЯСНЕННЯ

Якщо сумарна потужність усіх споживачів більше потужності одного трансформатора, паралельно повинні вмикатися два або декілька трансформаторів. На користь паралельної роботи свідчать такі вимоги, як необхідність повного навантаження за повний проміжок часу, ремонти та ін.

Для нормальної роботи при паралельному ввімкненні потрібні такі умови:

- 1) коефіцієнти трансформації повинні бути однаковими;
- 2) групи обмоток мають бути однаковими;
- 3) напруги короткого замикання повинні бути рівними.

Якщо першу і другу умови не виконують, виникає різниця ЕРС вторинних обмоток і навіть при відсутності навантаження по вторинній обмотці потече вирівнювальний струм:

$$I_{yp} = \frac{\Delta E_{2л}}{2\sqrt{3}Z_{к2}}, \quad (15)$$

де $Z_{к2}$ — опір короткого замикання зі сторони затискачів а, в, с. Цей струм тече і під навантаженням, накладаючись на робочі струми, він збільшує струм одного трансформатора (з більшою E_2) і зменшує струм другого. Оскільки перевантаження неприпустиме, доводиться зменшувати загальну потужність споживачів і частина трансформаторів виявляється недовантаженою. При великих I_{yp} паралельне ввімкнення трансформаторів неприпустиме.

4.3. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему, не вмикаючи навантаження (перемикач S6 ввімкнути на $R_{пн}$). Обидві обмотки перемикачами S8 і S9 з'єднати Y. На одному стенді ввімкнути SA7 (SA6 вимкнений), на другому ввімкнути і SA6 і SA7. Вольтметром зі щупами виміряти напругу і занести результат до табл. 13.

Таблиця 13 - Перевірка умов паралельного ввімкнення

Виміряно				Розраховано	
$U_{1-2'}$	$U_{2-1'}$	$U_{1-1'}$	$U_{2-2'}$	$\Delta E_{2л}$	I_{yp}
В	В	В	В	В	А

Тут $\Delta E_{2л} = \frac{U_{1-1'} - U_{2-2'}}{2}$; $Z_{к2}$ беруть із роботи № 1. Якщо $U_{1-2'}$ і $U_{2-1'}$

близько 130 В, $I_{yp} < 2$ А, перша умова виконана приблизно, а друга — точно і ввімкнення на паралельну роботу припустиме. Якщо $\Delta E_{2л}$ і I_{yp} великі, першу і другу умови не виконують, паралельна робота неможлива.

2. Увімкнути SA6 і SA7 на обох стендах, а покази К-50 занести до табл. 14.

Таблиця 14 - Паралельне ввімкнення без навантаження

Виміряно										Розраховано			
α_i	U_A	I_A	P_A	U_B	I_B	P_B	U_C	I_C	P_C	U_A	$I_{yp} = I_L$	P	$\cos \varphi$

3. Перевести S6 у нижнє положення, підімкнувши навантаження. SA6 і SA7 вимкнути. Подати напругу і записати струми навантаження при роздільній роботі трансформатора до табл. 15. Замкнути SA7, потім SA6 і записати струми навантаження при паралельній роботі.

Таблиця 15 - Струми навантаження

Роздільна робота					Паралельна робота					Векторна діаграма			
α_i	I_A	I_B	I_C	I_L	α_i	I_A	I_B	I_C	I_L	I_L			

4. Вибираємо масштаб і будуємо векторну діаграму струмів, відкладаючи графічно I_L при роздільній роботі (він чисто активний, $\cos \varphi = 1$, $\varphi = 0$) та I_{yp} з табл. 14 (враховуючи знак). Результат заносимо до останньої графі табл. 15 і порівнюємо з I_L при паралельній роботі.

5. Порівняти дані табл. 15 двох стендів і зробити висновок про якість паралельної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Необхідність паралельної роботи трансформаторів.
2. Які три умови паралельного ввімкнення трансформаторів?
3. Якою є практична перевірка трьох умов?
4. Причина необхідності виконання трьох умов?
5. Якої з умов треба дотримуватись точно? Чому?

Зміст

1.	Загальні вказівки.	3
2.	Лабораторна робота № 1. Холостий хід і коротке замикання трифазного трансформатора.....	12
3.	Лабораторна робота № 2. Дослідження трифазного трансформатора з навантаженням.....	18
4.	Лабораторна робота № 3. Перевірка маркування і груп сполучення обмоток трифазного трансформатора.....	21
5.	Лабораторна робота № 4. Дослідження паралельної роботи трифазних трансформаторів.....	23
6.	Зміст.....	26
7.	Список літератури.....	27

Список літератури

1. И.П. Копылов. Электрические машины. М.: Энергоиздат., 2004.
2. Яцун М.А. Електричні машини. – Львів: Вид. Нац. університету “Львівська політехніка”, 2001. – 428 с.
3. А.В. Иванов-Смоленский. Электрические машины. М.: Энергия, 1988.
4. А.И. Вольдек. Электрические машины. Л.: Энергия, 1984.
5. Читечян В.И. Электрические машины: Сборник задач. – М.: Высш. шк., 1988. -231 с.
6. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. М.: Высш. шк., 1990. –528 с.

Навчальне видання

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу «**Електричні машини**».
Трансформатори (для студентів та слухачів другої вищої освіти напрямів підготовки 6.050701 «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 «Електроелектромеханіка»).

Укладачі: Глебова Марина Леонідівна,
Чернявська Маргарита Василівна,
Кузнєцов Анатолій Іванович,
Фінкельштейн Володимир Борисович

Відповідальний за випуск: *О. В. Дорохов*

Редактор: *З. М. Москаленко*

Коректор: *З. І. Зайцева*

План 2007, поз. 345

Підп. до друку 27.02.2007
Друк на ризографі
Тираж 200 пр.

Формат 60x84 1/16
Ум. друк. арк. 1,6
Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 731 від 19.12.2001